

⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑯ Offenlegungsschrift  
⑯ DE 199 27 806 A 1

⑯ Int. Cl. 7:  
**H 01 L 21/3065**  
C 23 F 4/00  
C 30 B 33/12  
H 01 L 21/308

⑯ Aktenzeichen: 199 27 806.7  
⑯ Anmeldetag: 18. 6. 1999  
⑯ Offenlegungstag: 4. 1. 2001

⑯ Anmelder:  
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

⑯ Erfinder:  
Becker, Volker, 76359 Marxzell, DE; Laermer, Franz,  
Dr., 70437 Stuttgart, DE; Schilp, Andrea, 73525  
Schwäbisch Gmünd, DE; Beck, Thomas, 71737  
Kirchberg, DE

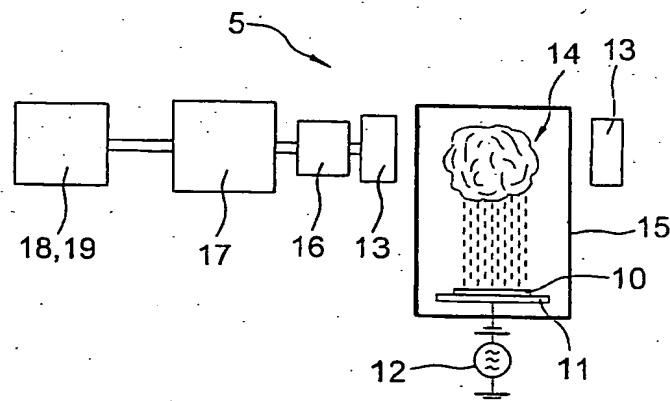
⑯ Entgegenhaltungen:  
US 58 11 022  
US 49 85 114  
US 47 95 529

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑯ Vorrichtung und Verfahren zum Hochratenätzen eines Substrates mit einer Plasmaätzanlage und Vorrichtung und Verfahren zum Zünden eines Plasmas und Hochregeln oder Pulsen der Plasmaleistung

⑯ Es wird eine Vorrichtung und ein damit durchführbares Verfahren zum vorzugsweise anisotropen Ätzen eines Substrates (10), insbesondere eines strukturierten Siliziumkörpers, mittels eines Plasmas (14) vorgeschlagen. Dabei wird das Plasma (14) mit einer Plasmaquelle (13) erzeugt, an die zum Anlegen einer Hochfrequenzleistung ein Hochfrequenzgenerator (17) angeschlossen ist. Dieser steht weiter mit einem ersten Mittel in Verbindung, das eine periodische Änderung der an der Plasmaquelle (13) anliegenden Hochfrequenzleistung bewirkt. Daneben ist vorzugsweise ein zweites Mittel vorgesehen, das eine Anpassung der Ausgangsimpedanz des Hochfrequenzgenerators (17) an die jeweilige, als Funktion der Hochfrequenzleistung sich ändernde Impedanz der Plasmaquelle (13) bewirkt. Das vorgeschlagene anisotrope Ätzverfahren erfolgt in separaten und alternierenden Ätz- und Polymerisationsschritten, wobei während der Ätzschritte zu mindest zeitweise eine höhere, bis zu 5000 Watt große Hochfrequenzleistung an der Plasmaquelle (13) angelegt wird, als während der Depositionsschritte. Die vorgeschlagene Vorrichtung eignet sich auch zum Zünden eines Plasmas (14) und zum Hochregeln oder Pulsen einer Plasmaleistung von einem Startwert auf bis zu 5000 Watt.



## Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zum insbesondere anisotropen Hochratenätzen eines Substrates mit einer Plasmaätzanlage, wobei periodisch variierte Plasmaleistungen von bis zu 5000 Watt erreicht werden können, sowie eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Zünden eines Plasmas und zum Hochregeln oder Pulsen der Plasmaleistung, nach der Gattung der unabhängigen Ansprüche.

## Stand der Technik

Aus der DE 42 41 045 C1 ist ein Verfahren zum anisotropen Ätzen von Silizium mit hohen Ätzraten und hoher Massenselektivität bekannt, wobei eine hochdichte Plasmaquelle mit vorzugsweise induktiver Hochfrequenzanregung eingesetzt wird, um aus einem fluorliefenden Ätzgas Fluorradikale und aus einem teflonbildende Monomere liefernden Passiviergas ( $CF_2$ )-Radikale freizusetzen. Dabei werden Ätz- und Passiviergas alternierend eingesetzt, wobei während der Passivierschritte oder Polymerisationsschritte auf den Seitenwänden bereits geätzter Strukturen ein Seitenwandpolymerfilm aufgebaut wird, der in den an sich isotropen Ätzschritten mit Ionenunterstützung jedesmal teilweise wieder abgebaut und gleichzeitig der Siliziumstrukturgrund durch Fluorradikale geätzt wird. Dieser Prozeß benötigt eine hochdichte Plasmaquelle, die auch eine relativ hohe Dichte von Ionen ( $10^{10}$ - $10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ) niedriger Energie generiert.

Eine für viele Applikationen erforderliche Steigerung der Ätzrate ist im allgemeinen zu erwarten, wenn die in das Plasma eingekoppelte Hochfrequenzleistung gesteigert wird.

Bei Verfahren nach Art der DE 42 41 045 C1 ist dies jedoch überraschenderweise nicht der Fall. Man beobachtet stattdessen, daß sich die Ätzrate in Silizium bei einer Leistungserhöhung der Plasmaquelle nur geringfügig erhöht, während gleichzeitig unerwünschte Profilabweichungen besonders im oberen Drittel der erzeugten Trenchgräben stark zunehmen, so daß Profileinschnitte, oder Hinterschneidungen des Maskenrands auftreten.

Diese Effekte stammen einerseits aus unerwünschten kapazitiven Einkopplungen aus Bereichen der induktiven Plasmaquelle, die sehr hohe hochfrequente Spannungen führen. Bei höheren Leistungen und Spannungen sind naturgemäß auch diese unerwünschten Störeffekte höher.

Insoweit die Plasmaquelle selbst betroffen ist, lassen sich die genannten Effekte durch fortgeschrittenere Speisekonzepte der Plasmaquelle und beispielsweise durch Einsatz einer speziellen Apertur, wie sie in der DE 197 34 278 C1 beschrieben sind, zumindest weitgehend beheben. Es verbleiben jedoch diejenigen Profilverschlechterungen, die prozeßbedingt sind und daher prozeßseitig angegangen werden müssen.

Während bei einfachen Plasmastrukturierungsprozessen eine Erhöhung der Plasmaleistung aufgrund der daraus resultierenden vermehrten Produktion von Ionen und Ätzspezies zur gewünschten Steigerung der Ätzrate führt, sind bei dem Verfahren nach Art der DE 42 41 045 C1 neben den Ätzschritten auch die Depositionsschritte zu berücksichtigen. Eine Erhöhung der Plasmaleistung in den Ätzschritten führt dabei nicht nur zur gewünschten vermehrten Produktion von Ätzspezies und Ionen, sondern verändert in charakteristischer Weise auch die Depositionsschritte.

Ein sehr wesentlicher Aspekt der DE 42 41 045 C1 ist der Seitenwandfilmtransportmechanismus, der während der an sich isotropen Ätzschritte dafür sorgt, daß der Seitenwandenschutzfilm beim Weiterätzen mit in die Tiefe des Trenchgra-

bens bewegt wird und bereits dort für einen lokalen Kantschutz sorgen kann. Während der Depositions- oder Polymerisationsschritte selbst ist ein solcher Transportmechanismus jedoch nur innerhalb gewisser Grenzen erwünscht. So soll insbesondere vermieden werden, daß bereits während der Depositionsszyklen zuviel Seitenwandpolymer nach unten in die Trenchgräben getrieben wird und dann oben fehlt, d. h. der Seitenwandfilm wird dort zu dünn.

Bei einer Erhöhung der Plasmaleistung in den Ätz- und Depositionsschritten erfolgt nun beispielsweise bei einem Prozeß gemäß der DE 41 42 045 C1, an sich ungewollt, auch während der Depositionsschritte, in Konkurrenz zur Beschichtung der Seitenwände ein vermehrter Polymertransport von der Seitenwand in die Tiefe der Trenchgräben, da sich oberhalb einer gewissen Plasmaleistung die Depositionsraten nicht mehr wesentlich steigern läßt, sondern stattdessen vermehrt Ionen produziert werden, die auf das zu ätzende Substrat einfallen.

Dieser zunehmende Ionenfluß zum Substrat führt aufgrund des Plasmapotentials, das auch ohne eine zusätzlich angelegte Substratelektrodenspannung etwas oberhalb des Substratpotentials liegt, dazu, daß bereits während der Depositionsschritte ein zunehmender Teil des deponierten Filmmaterials in die Tiefe der Trenchgräben und zum Ätzgrund gedrückt wird. Insbesondere weist das Plasma gegenüber geerdeten Oberflächen und damit auch gegenüber einem Substrat auf der Substratelektrode ein Plasmapotential von einigen Volt bis zu einigen 10 Volt auf, was einer entsprechenden Ionbeschleunigung zum Wafer hin gleichkommt. Eine erhöhte Ionendichte bedeutet daher auch eine vermehrte Ioneneinwirkung auf die Substratoberfläche und speziell auf die Trenchseitenwände, obwohl explizit keine Ionbeschleunigungsspannung an die Substrate angelegt wird.

Infolge des erläuterten bei sehr hohen Plasmaleistungen bewirkten Polymerabtrags und -verschleppens in die Tiefe der Trenchgräben bereits während der Depositionsschritte, fehlt schließlich bei hohen Plasmaleistungen in den oberen Teilen der geätzten Trenchgräben das in den nachfolgenden Ätzschritten zum Seitenwandschutz benötigte Polymermaterial, was sich in den erwähnten Profilabweichungen etwa im oberen Drittel des Trenchprofils manifestiert. Zugleich stört das im Übermaß zum Ätzgrund transportierte Polymermaterial auch den Ätzabtrag in den nachfolgenden Ätzschritten und führt insgesamt zur beobachteten Sättigung der Ätzrate trotz weiterer Leistungserhöhung in der Quelle. Ein weiterer Effekt in diesem Zusammenhang ist die "Härtung" des abgeschiedenen Polymermaterials bei sehr hohen Leistungsdichten, d. h. ein gesteigerter Kohlenstoffanteil in derart verdichtetem Polymer, was den nachfolgenden Polymerabtrag erschwert und damit die Ätzraten reduziert.

Es ist daher Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Sättigung der Ätzrate trotz einer höheren, von der Plasmaquelle bereitgestellten Hochfrequenzleistung zu überwinden und somit die Ätzrate damit drastisch zu steigern. Es ist weiter Aufgabe der Erfindung, das Zünden und die Einkopplung von sehr hohen Hochfrequenzleistungen in eine insbesondere induktive Plasmaquelle stabil möglich zu machen.

## 60 Vorteile der Erfindung

Die erfindungsgemäßen Vorrichtungen und die erfindungsgemäßen Verfahren mit den kennzeichnenden Merkmalen der unabhängigen Ansprüche haben gegenüber dem Stand der Technik den Vorteil, daß damit eine periodische Änderung der an einer Plasmaquelle anliegenden Hochfrequenzleistung ermöglicht wird, so daß beispielsweise alternierende Depositions- bzw. Polymerisations- und Ätz-

schrifte sehr vorteilhaft mit unterschiedlich hohen Hochfrequenzleistungen betrieben werden können. Dabei wird sehr vorteilhaft während der Ätzschritte zumindest zeitweise eine jeweils höhere Hochfrequenzleistung an der Plasmaquelle angelegt, als während der Depositionsschritte.

Weiterhin lassen sich durch die erfindungsgemäße Vorrichtung zum Ätzen und das erfindungsgemäße Verfahren zum anisotropen Ätzen eines Substrates erheblich höhere Ätzraten erreichen, als mit bekannten Ätzverfahren oder Ätzvorrichtungen. Dabei wird zusätzlich die bisher im Stand der Technik bestehende Schwierigkeit überwunden, daß trotz einer kontinuierlichen Erhöhung der Plasmaleistung eine Sättigung der Ätzrate bei anisotropen Ätzverfahren eintritt, bei denen abwechselnd Depositionsschritte und Ätzschritte eingesetzt werden.

Weiterhin ist es sehr vorteilhaft, daß mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung und dem damit durchgeführten Verfahren zum Zünden und Hochregeln eines Plasmas die Einkoppelung von sehr hohen Hochfrequenzleistungen in eine insbesondere induktive Plasmaquelle überhaupt erst stabil möglich wird.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den in den Unteransprüchen genannten Maßnahmen.

So kann mit dem erfindungsgemäßen Verfahren das Verfahren gemäß der DE 42 41 045 C1 sehr vorteilhaft durch Anlegen einer niedrigen Plasmaleistung während der Depositionsschritte und durch Anlegen einer sehr hohen Plasmaleistung während der Ätzschritte erheblich verbessert werden, wobei extrem hohen Ätzraten, beispielsweise in Silizium, unter Beibehaltung der aus DE 42 41 045 C1 bekannten Vorteile erzielt werden. Insbesondere bleiben bei dem erfindungsgemäßen Ätzverfahren die Depositionsschritte sehr vorteilhaft nahezu unverändert. Die Ätzschritte werden weiter vorteilhaft mit sehr hohen Plasmaleistungen von bis zu 5000 Watt bei vorzugsweise erhöhtem SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub>-Fluß und vorzugsweise erhöhtem Prozeßdruck betrieben.

Daneben wird durch das erfindungsgemäße Zurückschalten der Hochfrequenzleistung während der Polymerisationsschritte die Uniformität des Ätzprozesses signifikant verbessert, so daß die Substratmitte und der Substrtrand nahezu identische Ätzraten aufweisen. Dies gilt insbesondere, wenn das erfindungsgemäße Verfahren zum Hochratenätzen mit einer Aperturvorrichtung in der Plasmaätzanlage kombiniert wird, wie sie aus DE 197 34 278 bekannt ist. Eine ganz besonders vorteilhafte Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens hinsichtlich der Uniformität der Ätzung über einen Wafer ergibt sich dann, wenn eine Plasmaätzanlage wie sie beispielsweise aus DE 197 34 278 bekannt ist, weiter mit einer symmetrisch gespeisten Plasmaquelle betrieben wird, wie sie in der Anmeldung DE 199 00 179 vorgeschlagen wurde.

Weiterhin wird es mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung zum Ätzen eines Substrates sehr vorteilhaft möglich, auch sehr hohe Hochfrequenzleistungen von bis zu 5000 Watt in insbesondere induktive Plasmaquellen stabil einzukoppeln. Dazu ist vorteilhaft ein zweites Mittel, insbesondere ein automatisierter Impedanztransformator vorgesehen, dessen Regelung entsprechend der Variation der Hochfrequenzleistung der Plasmaquelle erfolgt. Die geschwindigkeitsangepaßte Leistungsvariation der Plasmaquelle bzw. des diese speisenden Hochfrequenzgenerators wird überdies gleichzeitig vorteilhaft über einen Rampengenerator erzielt.

Die Regelung der Plasmaleistung mit einem Hochfrequenzgenerator und einem damit in Verbindung stehenden Rampengenerator sowie einem Impedanztransformator zur insbesondere fortwährenden und automatisierten Impedanzanpassung eignet sich dabei sehr vorteilhaft sowohl zum Zünden und zum Hochfahren eines Plasmas bis zu höchsten

Leistungswerten, als auch für das erfindungsgemäße Alternieren der Leistungsparameter an der Plasmaquelle zwischen Ätz- und Depositionsschritten.

Die vermehrte Bildung von Ätzspezies durch eine höhere Plasmaleistung kann vorteilhaft weiter dadurch gefördert werden, daß simultan mit der Leistungserhöhung auch der Fluß des fluorliefernden Ätzgases, beispielsweise SF<sub>6</sub>, erhöht wird. Zur Vermeidung von Schwefelausscheidungen im Abgasbereich der Ätzanlage ist dabei vorteilhaft entsprechend auch der Sauerstoffanteil einzustellen. Eine weitere vorteilhafte Möglichkeit zur Steigerung der Produktion von Fluorradikalen parallel zur Leistungserhöhung in den Ätzschritten ist die Erhöhung des Prozeßdrucks. Dadurch werden im Ätzplasma vorteilhaft vermehrt Fluorradikale anstelle von zusätzlichen Ionen produziert und somit das Verhältnis der Zahl der Fluorradikale zur Ionendichte erhöht. Das Überschreiten einer gewissen Ionendichte bei sehr hohen Plasmaleitungen ist nachteilig.

Im übrigen wird während der Deposition- oder Polymerisationsschritte vorteilhaft keine Leistungserhöhung auf beispielsweise mehr als 1500 Watt durchgeführt. Da die Depositionsraten auf dem Substrat bereits bei relativ kleiner Leistung von 400 Watt bis 800 Watt ausreicht, würde eine Leistungssteigerung der Plasmaquelle in den Depositionsschritten bei sonst unveränderten Plasmaätzparametern ohnehin nur wenige zusätzliche Depositionsspezies liefern bzw. das abgeschiedene Polymer zu stark verdichten und zu einer Kohlenstoffanreicherung im Polymer führen. Durch die Beibehaltung der ursprünglichen, niedrigen Leistung im Depositionsprozeß von bis zu 1500 Watt wird weiter gleichzeitig vorteilhaft vermieden, daß die Ionendichte und damit die Ioneneinwirkung auf das Substrat während der Depositionsschritte erhöht wird. Damit treten die erläuterten schädlichen Folgen einer erhöhten Ionendichte während der Depositionsschritte nicht auf.

#### Zeichnung

Die Erfindung wird anhand der Zeichnung und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Die Fig. 1 zeigt eine Plasmaätzanlage mit Anbauteilen, Fig. 2 einen ersten, in einem analogen Rampengenerator eingesetzten RC-Kreis, Fig. 3 einen zweiten RC-Kreis mit einer Diode und Fig. 4 einen dritten RC-Kreis mit zwei Dioden.

#### Ausführungsbeispiele

Die Fig. 1 zeigt eine Plasmaätzanlage 5 mit einem Substrat 10, insbesondere einem strukturierten Siliziumwafer, der in einem anisotropen Plasmaätzverfahren mit Trenchgräben versehen werden soll und einer Substratelektrode 11, an die über einen Substratspannungsgenerator 12 eine hochfrequente Wechselspannung an der Substratelektrode 11 und darüber auch an dem Substrat 10 anliegt. Weiter ist eine Plasmaquelle 13 in Form einer an sich bekannten induktiven Plasmaquelle (ICP-Spule) vorgesehen, die in einem Reaktor 15 mit einem eingeleiteten Reaktivgasgemisch ein Plasma 14 erzeugt. Dazu wird über einen Hochfrequenzgenerator 17 ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld generiert, dem das Reaktivgasgemisch ausgesetzt ist. Eine derartige Anordnung ist beispielsweise aus DE 197 34 278 C1 bekannt. Weiter ist in Fig. 1 vorgesehen, daß der Hochfrequenzgenerator 17 mit einem Bauteil 18 in Verbindung steht, in das ein Rampengenerator 19 integriert ist, und daß der Hochfrequenzgenerator 17 und die Plasmaquelle 13 mit einem aus dem Stand der Technik bekannten Impedanztransformator 16 ("Matchbox") in Verbindung steht. Die Funktion und der Aufbau einer derartigen "Matchbox" ist an

sich bekannt. Eine besonders vorteilhafte Ausführung der "Matchbox" in Verbindung mit einer induktiven Plasmaquelle mit balancierter Spuleneinspeisung wird in der unveröffentlichten Anmeldung DE 199 00 179.5 beschrieben.

Mit der Plasmaätzanlage 5 wird nun beispielsweise ein anisotroper Ätzprozeß mit alternierenden Ätz- und Depositionsschritten oder Polymerisationsschritten durchgeführt, wie er beispielsweise in DE 197 34 278 C1 oder insbesondere in DE 42 41 045 C1 beschrieben ist, wobei die an der Plasmaquelle 13 anliegende Hochfrequenzleistung periodisch verändert wird.

Dazu werden zunächst während der Depositionsschritte Hochfrequenzleistungen von 400 Watt bis maximal 1500 Watt, vorzugsweise von 600 Watt bis 800 Watt an die induktive Plasmaquelle 13 angelegt. Der Prozeßdruck liegt dabei zwischen 5 mTorr bis 100 mTorr, beispielsweise bei 20 mTorr.

Der Gasfluß für des im erläuterten Beispiel als Passiviergas verwendeten Octafluorcyclobutan ( $C_4F_8$ ) oder Hexafluorpropen ( $C_3F_6$ ) beträgt 30 sccm bis 200 sccm, vorzugsweise 100 sccm. Die Zeitdauer eines Depositionsschritts beträgt 1 Sekunde bis 1 Minute, beispielsweise 5 Sekunden.

Während der den Depositionsschritten nachfolgenden Ätzschritten werden Hochfrequenzleistungen von 600 Watt bis 5000 Watt, vorzugsweise von 3000 Watt, an die induktive Plasmaquelle 13 angelegt. Der Prozeßdruck liegt dabei zwischen 5 mTorr und 100 mTorr, beispielsweise bei 30 mTorr oder 50 mTorr, und ist bevorzugt gegenüber dem Prozeßdruck während der Depositionsschritte erhöht. Die eingesetzten Gasflüsse betragen im Fall des im erläuterten Beispiels verwendeten Ätzgases SF<sub>6</sub> 100 sccm bis 500 sccm, vorzugsweise 200 sccm bis 300 sccm, wobei dem Ätzgas SF<sub>6</sub> zur Vermeidung von Schwefelausscheidungen im Abgasbereich der Plasmaätzanlage 5 in einem Anteil von 10 bis 20%, vorzugsweise 15%, in an sich bekannter Weise Sauerstoff zugesetzt ist.

Weiter wird während der Ätzschritte zur Beschleunigung von im Plasma 14 erzeugten Ionen zum Substrat 10 an die Substratelektrode 11 eine Hochfrequenzleistung von 1 Watt bis 50 Watt angelegt. Diese beträgt im erläuterten Beispiel im Fall eines üblichen 6"-Siliziumwafers als Substrat 10 8 Watt. Entsprechend der jeweiligen Hochfrequenzleistung liegt weiter eine Ionenbeschleunigungsspannung von 1 V bis 50 V, beispielsweise 15 V an der Substratelektrode 11 an. Die Dauer eines Ätzschrittes beträgt ca. 3 Sekunden bis zu 2 Minuten. Im erläuterten Beispiel ist sie bei ca. 10 Sekunden.

Das Anlegen von sehr hohen Leistungen von bis zu 5000 Watt an die induktive Plasmaquelle 13 ist technisch sehr problematisch, da sich die Plasmamimpedanz in dem Maße verändert, wie die Leistung an der Plasmaquelle 13 gesteigert wird. Dies liegt daran, daß mit wachsender Plasmaleistung, also wachsender Erregung des Plasmas 14, eine wachsende Elektronen- und Ionendichte im Plasma 14 produziert wird. Mit der höheren Elektronen- und Ionendichte wird das Plasma 14 aber aus der Sicht der Plasmaquelle 13 zunehmend "niederohmiger", d. h. man nähert sich mehr und mehr dem bei hochdichten Plasmen gegebenen Idealzustand, dem "Kurzschlußfall", an. Dies bedeutet gleichzeitig, daß sich die Anpassungsbedingungen der induktiven Plasmaquelle 13 an den Hochfrequenzgenerator 17, der üblicherweise eine feste Ausgangsimpedanz von meist 50 Ω aufweist, verändert, und zwar dynamisch mit wachsender Leistung. Es ist daher eine Anpassung der Ausgangsimpedanz des Hochfrequenzgenerators 17 an die Impedanz der induktiven Plasmaquelle 13 erforderlich, welche wesentlich von der produzierten Ladungsträgerdichte im Plasma 14 abhängt.

Dazu ist im erläuterten Beispiel der Impedanztransformator 16 ("Matchbox") vorgesehen. Dieser Impedanztransformator 16 stellt üblicherweise durch automatische und kontinuierliche oder schrittweise Variation zweier Dreh kondensatoren, die einen kapazitiven Transformator (Spannungsteiler) bilden, sicher, daß das Plasma 14 bzw. die Plasmaquelle 13 hinsichtlich ihrer Impedanz stets optimal an den Hochfrequenzgenerator 17 und dessen Hochfrequenzleistung angepaßt ist. Stimmt diese Anpassung nicht, treten reflektierte Leistungen bis zu 100% der zugeführten Hochfrequenzleistung auf, die in den Hochfrequenzgenerator 17 zurücklaufen und dort üblicherweise zu einer Rückregelung der Vorwärtsleistung führen, um eine Zerstörung der Generatorenstufe zu verhindern. Bei den im erläuterten Beispiel eingesetzten Plasmaleistungen von bis zu 5000 Watt erfolgt diese Impedanzanpassung notwendigerweise dynamisch.

So wird zum Zünden des Plasmas 14 der Impedanztransformator zunächst in eine sogenannte "Preset"-Position gefahren, die bis zu einer gewissen, niedrigen Plasmaleistung der optimalen "Brennposition" des Impedanztransformators 16, d. h. der Position des Impedanztransformators 16 im Zustand "Plasma an, geringe Leistung", entspricht. Die Automatik des Impedanztransformators 16 muß in diesem Fall nur eine Feinregelung übernehmen, um kleine Toleranzen der Plasmamimpedanz auszugleichen. Steigt die Plasmaleistung im weiteren dann aber auf Werte von beispielsweise mehr als 1000 Watt an, wie sie im erläuterten Beispiel während der Ätzschritte oder beim Hochregeln der Plasmaleistung nach dem Zünden eingesetzt werden, ändert sich die Plasmamimpedanz signifikant. So ist beispielsweise bei 3000 Watt eingekoppelter Hochfrequenzleistung an der induktiven Plasmaquelle 13 die Einstellung des Impedanztransformators 16 signifikant verschieden von der Zündposition bzw. der Position mit niedriger Plasmaleistung.

Entsprechendes gilt, wenn die Plasmaleistung, wie im vorliegenden Beispiel beim Übergang von einem Depositionsschritt zu einem Ätzschritt, von einem niedrigeren zu einem deutlich höheren Wert umgeschaltet wird. Der Leistungssprung zieht entsprechenden Korrekturbedarf am Impedanztransformator 16 nach sich. Erfolgt diese Korrektur nicht schnell genug, kommt es generatorseitig zur schlagartigen Rücknahme der Vorwärtsleistung durch entsprechende Schutzschaltungen und infolgedessen zum zeitweiligen Erlöschen oder fortwährenden Blinken des Plasmas 14.

Die erläuterten Schwierigkeiten beim Zünden und Hochregeln eines Plasmas 14 im Fall von Plasmaleistungen zwischen 800 Watt und 5000 Watt, sowie das periodische Umschalten der Plasmaleistung, beispielsweise zwischen Depositionsschritten und Ätzschritten werden in bevorzugter Ausgestaltung der Erfindung im erläuterten Beispiel dadurch gelöst, daß die Leistungserhöhung des Hochfrequenzgenerators 17 "adiabatisch" erfolgt, das heißt kontinuierlich oder schrittweise mit einer Anstiegsgeschwindigkeit, die durch den Impedanztransformator 16 dynamisch ausgeregelt werden kann. Im erläuterten Beispiel heißt das, daß die Plasmaleistung beispielsweise beim Übergang von einem Depositionsschritt zu einem Ätzschritt verlangsamt erhöht wird, während sich gleichzeitig der Impedanztransformator 16 kontinuierlich an die sich verändernden Impedanzverhältnisse aufgrund der sich verändernden Plasmabedingungen anpaßt bzw. diese ausregelt.

Im konkreten Fall der Plasmazündung stellt sich dies folgendermaßen dar: Der Impedanztransformator 16 steht in der vorgeählten Zündposition und der Hochfrequenzgenerator 17 beginnt seine Ausgangsleistung kontinuierlich oder schrittweise in kleinen Schritten von einem vorgegebenen Startwert auf einen Zielwert hochzuregeln. Nun wird bei einer gewissen Leistung, beispielsweise 400 Watt das Plasma

14 zünden, so daß an der Plasmaquelle 13 eine definierte Impedanz vorliegt. Während der Hochfrequenzgenerator 17 seine Ausgangsleistung dann weiter steigert, werden im Plasma 14 mehr und mehr Ladungsträger produziert und damit die Plasma- bzw. Quellenimpedanz verändert. Der Impedanztransformator 16 trägt diesen Veränderungen dadurch Rechnung, daß er kontinuierlich und automatisch die korrekte Impedanztransformation, beispielsweise in an sich bekannter Weise durch Verstellen von Drehkondensatoren, sicherstellt. In dem Maße, wie die Generatorausgangsleistung wächst, paßt der Impedanztransformator 16 seine Einstellung zumindest zeitweilig also den dadurch bewirkten Plasmabedingungen automatisch und möglichst gleichzeitig an. Auf diese Weise können daher auch Plasmaleistungen von mehreren kWatt, insbesondere bis zu 5000 Watt, stabil in das Plasma 14 eingekoppelt werden.

Typische Werte für den Startwert liegen im erläuterten Beispiel bei ca. 0 bis 400 Watt, während der Zielwert üblicherweise 800 Watt bis 5000 Watt beträgt. Die erforderliche Zeit für die Erhöhung der Leistung zwischen Start- und Zielwert liegt typischerweise bei 0,2 sec bis 5 sec, insbesondere 0,5 sec bis 2 sec.

Wesentlich ist im erläuterten Beispiel, daß zumindest bei Leistungsanstiegen keine sprunghaften Änderungen der Leistung des Hochspannungsgenerators 17 auftreten, die von dem Impedanztransformator 16 nicht ausgeregelt werden können, sondern möglichst alle Leistungsänderungen der Regelgeschwindigkeit des Impedanztransformators 16 angepaßt sind.

Dies gilt insbesondere auch für das erfindungsgemäße Alternieren der Plasmaleistung von einem niedrigeren Wert während der Depositionsschritte zu einem sehr hohen Wert, vorzugsweise im kWatt-Bereich, während der Ätzschritte. Der Depositionsschritt ist dabei mit seiner relativ niedrigen Leistung zunächst unkritisch. Erfolgt nun der Wechsel zum Ätzschritt, wird der Generator seine Ausgangsleistung langsam hochregeln, bis nach beispielsweise 2 Sekunden die volle, im Ätzschritt gewünschte Generatorleistung, an der Plasmaquelle 13 anliegt. Bei einer derartigen Anstiegs geschwindigkeit sind übliche Impedanztransformatoren problemlos in der Lage, die Einstellung entsprechend nachzuregeln.

Beim Wechsel in den Depositionsschritt kann man die Plasmaleistung auf den niedrigeren Wert, der in den Depositionsschritten gewünscht ist, entweder schlagartig oder bevorzugt ebenfalls "adiabatisch", d. h. verlangsamt und der Regelgeschwindigkeit des Impedanztransformators 16 angepaßt, auf den niedrigeren Leistungswert zurückfahren. Da die Leistung in den Depositionsschritten unkritisch niedrig ist, stehen hier aber beide Optionen offen.

Die "adiabatische" Regelung der Leistung des Hochfrequenzgenerators 17 kann im erläuterten Beispiel entweder schrittweise in kleinen Schritten oder kontinuierlich erfolgen. Dazu wird beispielsweise in dem Bauteil 18 software gesteuert in an sich bekannter Weise ein digitaler Rampengenerator einprogrammiert, oder es wird ein ebenfalls an sich bekannter analoger Rampengenerator 19 in das Bauteil 18 integriert, der somit zwischen dem Sollwertausgang einer Leistungssteuerung, die beispielsweise in das Bauteil 18 integriert ist, und dem Sollwertausgang des Hochfrequenzgenerators 17 geschaltet ist.

Die Software-Steuering bzw. der digitale Rampengenerator empfiehlt sich insbesondere dann, wenn die Leistung des Hochfrequenzgenerators mit einem digitalen Befehl, beispielsweise über eine serielle Schnittstelle (RS232) angefordert wird, wie dies bei vielen bekannten Ätanlagen der Fall ist. In diesem Fall muß durch eine Folge digitaler Befehle die Leistung des Hochfrequenzgenerators 17 in kleinen

Schritten, ausgehend vors einem Startwert, bis zum gewünschten Zielwert hochgefahren werden.

Die analoge Variante über den analogen Rampengenerator 19 zwischen dem Ausgang der Anlagensteuerung und einem Generatorsollwertausgang empfiehlt sich insbesondere dann, wenn der Hochfrequenzgenerator 17 mit einem Analogsignal, beispielsweise einem Pegelwert zwischen 0 V und 10 V, gesteuert wird.

Die einfachste Version eines analogen Rampengenerators 19 ist ein in Fig. 2 dargestellter erster RC-Kreis 23 mit entsprechend der gewünschten Anstiegsgeschwindigkeit der Leistung des Hochfrequenzgenerators 17 angepaßter Zeitkonstante. Dieser erste RC-Kreis weist sowohl in Aufwärts- als auch in Abwärtsrichtung eine Verzögerungswirkung auf.

Soll der analoge Rampengenerator 19 nur in Aufwärtsrichtung wirksam sein, d. h. nur bei Leistungssteigerung, eine gewünschte Abnahme der Leistung des Hochfrequenzgenerators 17 aber sofort d. h. instantan erfolgen, verwendet man bevorzugt einen zweiten, mit einer Diode versehenen RC-Kreis 24, wie er in Fig. 3 dargestellt ist.

Sind für das Hochregeln und das Herunterregeln der Leistung des Hochfrequenzgenerators 17 zwei frei wählbare Verzögerungswerte gewünscht, setzt man bevorzugt einen dritten, mit zwei unterschiedlichen Widerständen und jeweils zugeordneten Dioden versehenen RC-Kreis 25 ein, wie er in Fig. 4 dargestellt ist.

Die in den Fig. 2 bis 4 erläuterten Schaltungsbeispiele für Rampengeneratoren sind jedoch Stand der Technik und sollen nur die Ausführung der erfindungsgemäßen Varianten erläutern und dem Fachmann Anhaltspunkte geben, wie daraus die gewünschte Rampenfunktion abgeleitet werden kann. Insbesondere ist in den Fig. 2 bis 4 die Durchlaßspannung der Dioden von ca. 0,6 Volt nicht berücksichtigt.

Insgesamt liegt die typische Zeitspanne der Erhöhung der Hochfrequenzleistung beim Wechsel von einem Depositionsschritt zu einem Ätzschritt im erläuterten Beispiel bei 0,2 sec bis 5 sec, insbesondere 0,5 sec bis 3 sec. Die Zeitspanne der Erniedrigung der Hochfrequenzleistung beim Wechsel von einem Ätzschritt zu einem Depositions- oder Polymerisations schritt ist dagegen üblicherweise deutlich kürzer und liegt zwischen 0 sec bis 2 sec, insbesondere 0 sec bis 0,5 sec.

#### Bezugszeichenliste

- 45 5 Plasmaätzanlage
- 10 Substrat
- 11 Substratelektrode
- 12 Substratspannungsgenerator
- 13 Plasmaquelle
- 50 14 Plasma
- 15 Reaktor
- 16 Impedanztransformator
- 17 Hochfrequenzgenerator
- 18 Bauteil
- 55 19 Rampengenerator
- 23 erster RC-Kreis
- 24 zweiter RC-Kreis
- 25 dritter RC-Kreis

#### Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Ätzen eines Substrates (10), insbesondere eines strukturierten Siliziumkörpers, mittels eines Plasmas (14), mit einer Plasmaquelle (13) zum Generieren eines hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes, an die mit einem Hochfrequenzgenerator (17) eine Hochfrequenzleistung anlegbar ist, und einem Reaktor (15) zum Erzeugen des Plasmas (14) aus

- reaktiven Teilchen durch Einwirken des hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes auf ein Reaktivgas oder ein Reaktivgasgemisch, dadurch gekennzeichnet, daß ein erstes Mittel vorgesehen ist, das eine periodische Änderung der an der Plasmaquelle (13) anliegenden Hochfrequenzleistung bewirkt. 5
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das erste Mittel ein Bauteil zur Leistungssteuerung des Hochfrequenzgenerators ist, in das über eine Software ein digitaler Rampengenerator eingespielt ist, oder daß das Mittel ein Bauteil (18) zur Leistungssteuerung des Hochfrequenzgenerators ist, das einen analogen Rampengenerator (19) aufweist. 10
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der analoge Rampengenerator (19) einen insbesondere mit mindestens einer Diode versehenen RC-Kreis (23, 24, 25) aufweist. 15
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein zweites Mittel vorgesehen ist, das zumindest zeitweilig während der periodischen Änderung der an der Plasmaquelle (13) anliegenden Hochfrequenzleistung eine Anpassung der Ausgangsimpedanz des Hochfrequenzgenerators (17) an die jeweilige, als Funktion der Hochfrequenzleistung sich ändernde Impedanz der Plasmaquelle (13) bewirkt. 20
5. Vorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Anpassung der Ausgangsimpedanz fortwährend oder schrittweise erfolgt und automatisiert ist, und daß die anliegende Hochfrequenzleistung zwischen 400 W und 5000 W liegt. 30
6. Vorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß das zweite Mittel ein Impedanztransformator (16) ist. 35
7. Verfahren zum anisotropen Ätzen eines Substrates (10) mit einer Vorrichtung nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, wobei der anisotrope Ätzvorgang in separaten, jeweils alternierend aufeinanderfolgenden Ätz- und Polymerisationsschritten durchgeführt wird, und wobei während der Polymerisationsschritte auf durch eine Ätzmaske definierte lateralen Strukturen ein Polymer aufgebracht wird, das während der nachfolgenden Ätzschritte jeweils wieder abgetragen wird, dadurch gekennzeichnet, daß während der Ätzschritte zumindest zeitweise eine jeweils höhere Hochfrequenzleistung an der Plasmaquelle (13) angelegt wird als während der Depositionsschritte. 45
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß während der Ätzschritte zumindest zeitweilig eine Hochfrequenzleistung von 800 Watt bis 5000 Watt, insbesondere von 2000 Watt bis 4000 Watt, und während der Depositionsschritte zumindest zeitweise eine Hochfrequenzleistung von 400 Watt bis 1500 Watt, insbesondere von 500 Watt bis 1000 Watt, an der Plasmaquelle (13) angelegt wird. 50
9. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Erhöhung der Hochfrequenzleistung beim Wechsel von den Depositionsschritten zu den Ätzschritten und/oder die Erniedrigung der Hochfrequenzleistung beim Wechsel von den Ätzschritten zu den Depositionsschritten schrittweise oder kontinuierlich erfolgt. 55
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest die Erhöhung der Hochfrequenzleistung derart erfolgt, daß in dieser Zeit zumindest zeitweilig über das zweite Mittel, insbesondere den Impedanztransformator (16), eine zumindest näherungsweise, insbesondere fortwährende oder schrittweise und automatisierte Impedanzanpassung des Hochfrequenzgenerators (17) an die Plasmaintpedanz erfolgt. 65

11. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Zeitdauer der Erhöhung der Hochfrequenzleistung beim Wechsel von einem Depositionsschritt zu einem Ätzschritt 0,2 sec bis 5 sec, insbesondere 0,5 sec bis 3 sec beträgt, und/oder daß die Zeitdauer der Erniedrigung der Hochfrequenzleistung beim Wechsel von einem Ätzschritt zu einem Depositionsschritt 0 sec bis 2 sec, insbesondere 0 sec bis 0,5 sec, beträgt. 12. Vorrichtung zum Zünden eines Plasmas (14) und zum Hochregeln oder Pulsen einer Plasmaleistung, mit einer Plasmaquelle (13), insbesondere einer induktiven Plasmaquelle, zum Generieren eines hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes, an die mit einem Hochfrequenzgenerator (17) eine Hochfrequenzleistung anlegbar ist, einem Reaktor (15) zum Erzeugen des Plasmas (14) aus reaktiven Teilchen durch Einwirken des hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes auf ein Reaktivgas oder ein Reaktivgasgemisch, dadurch gekennzeichnet, daß ein Mittel vorgesehen ist, über das, ausgehend von einem Startwert, eine kontinuierliche oder schrittweise Erhöhung der an der Plasmaquelle (13) anliegenden Hochfrequenzleistung auf einen Zielwert einstellbar ist. 13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß das Mittel ein Bauteil zur Leistungssteuerung des Hochfrequenzgenerators (17) ist, in das über eine Software ein digitaler Rampengenerator eingespielt ist, oder daß das Mittel ein Bauteil (18) zur Leistungssteuerung des Hochfrequenzgenerators (17) ist, das einen analogen Rampengenerator (19) aufweist. 14. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß ein Impedanztransformator (16) vorgesehen ist, der während der Erhöhung der Hochfrequenzleistung zumindest zeitweilig eine insbesondere fortwährende oder schrittweise und automatisierte Anpassung der Ausgangsimpedanz des Hochfrequenzgenerators (17) an die jeweilige, als Funktion der Hochfrequenzleistung sich ändernde Impedanz der Plasmaquelle (13) bewirkt. 15. Verfahren zum Zünden eines Plasmas (14) und zum Hochregeln einer Plasmaleistung mit einer Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 12 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die kontinuierliche oder schrittweise Erhöhung der Hochfrequenzleistung von dem Startwert zu dem Zielwert begleitet wird von einer zumindest zeitweiligen, über das zweite Mittel, insbesondere den Impedanztransformator (16), erfolgenden Impedanzanpassung des Hochfrequenzgenerators (17) an die jeweilige Plasmaintpedanz. 16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß der Startwert 0 bis 400 Watt und der Zielwert 800 Watt bis 5000 Watt beträgt, und daß die Erhöhung des Startwertes zu dem Zielwert über eine Zeitdauer von 0,2 sec bis 5 sec, insbesondere 0,5 sec bis 2 sec, erfolgt. 17. Verfahren nach Anspruch 15 oder 16, dadurch gekennzeichnet, daß das Zünden und Hochregeln des Plasmas (14) zeitlich gepulst erfolgt.

- Leerseite -

